



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

METODY POVLAKOVÁNÍ A ANALÝZY POVLAKŮ

METHODS OF COATING AND COATINGS ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Veronika Rudy

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Prokeš

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Veronika Rudy**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Prokeš**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metody povlakování a analýzy povlaků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor provede rešeršní studii na téma povlakování řezných nástrojů. V rámci práce provede depozici vybraného povlaku na substrát ze slinutého karbidu. Následně provede analýzu povlaku zvolenými metodami a vyhodnotí dosažené výsledky.

Cíle bakalářské práce:

- Úvod do problematiky povlakování řezných nástrojů.
- Zpracování návrhu povlaku na substrát ze slinutého karbidu.
- Depozice vybraného povlaku.
- Technické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

PÍŠKA, M. Povlaky, povlaky-bez nich to už prostě nepůjde!. MM Průmyslové spektrum. roč. 34. č. 1,2/ 2015. s. 53-54. 2015. ISSN: 1212- 2572.

REIDENBACH, F. R. ASM Handbook: Volume 5: Surface Engineering (Asm Handbook). 1994.

ÇELİK, Y. H., KILICKAP, E., GÜNEY, M. Investigation of cutting parameters affecting on tool wear and surface roughness in dry turning of Ti-6Al-4V using CVD and PVD coated tools. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39(6), 2085-2093. 2017.

MATTHEWS, A., ROHDE, S. L. Coatings and Surface Engineering: Physical Vapor Deposition. Mechanical Engineers' Handbook: Manufacturing and Management, 2005. 3: 396-413.

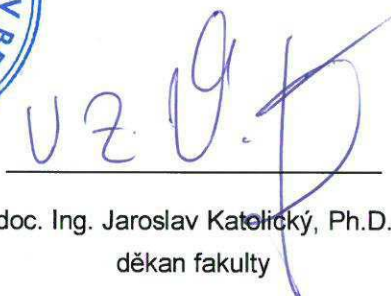
MATTOX, D. M. Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing. William Andrew, 2010.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 16. 10. 2018



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou povlakování řezných nástrojů. Shrnuje druhy materiálů pro řezné nástroje, charakteristiku hlavních metod povlakování, způsob úpravy nástroje před povlakováním a metody testování fyzikálních vlastností povlaků. Praktická část obsahuje popis depozice povlaků na vyměnitelné břitové destičky, přičemž byly deponovány dva typy povlaků (SHM1 a SHM2). Následně byly testovány jejich mechanické a fyzikální vlastnosti. Použité analýzy byly test adheze a koheze, tloušťka a tvrdost povlaku spolu s chemickým složením.

Klíčová slova

Druhy materiálu řezných nástrojů, vyměnitelné břitové destičky, povlakování, povlakování řezných nástrojů, metody povlakování, analýza povlaků,

ABSTRACT

The thesis deals with the coating of cutting tools. It summarizes the types of material used to create cutting tools, the characteristics of the main coating methods, the way tools are treated before coating and methods of testing the physical properties of coatings. The practical part contains the description of coating deposition on interchangeable cutting blades, where two types of coating were tested (SHM1 and SHM2). Furthermore, their mechanical and physical properties were tested. The analyzes used were adhesion and cohesion tests, coating thickness and hardness along with the chemical composition.

Key words

Types of material used to create cutting tools, cutting blades, coating, coating of cutting tools, coating methods, coating analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Rudy, Veronika. *Metody povlakování a analýzy povlaků*. Brno 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 42 s. Ing. Tomáš Prokeš.

Jakékoliv údaje, data nebo obrázky, týkající se obchodní společnosti SHM s.r.o., IČO: 47976519, se sídlem Průmyslová 3020/3, 787 01 Šumperk (dále jen „SHM s.r.o.“), a obsažené v této práci, nesmí být dále šířeny, reprodukovány, ani jakýmkoliv způsobem využity bez předchozího souhlasu obchodní společnosti SHM s.r.o.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Metody povlakování a analýzy povlaků** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Veronika Rudy

PODĚKOVÁNÍ

Tímto velice děkuji panu Ing. Tomáši Prokešovi za cenné připomínky, rady, trpělivost a čas který mi věnoval při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE	10
1.1 Nástrojové oceli	10
1.2 Slinuté karbidy	10
1.3 Řezná keramika.....	11
1.4 Cermety	12
1.5 Supertvrdé materiály.....	12
2 METODY POVLAKOVÁNÍ	13
2.1 PVD Povlakování	14
2.1.1 Naprašování (Sputtering)	15
2.1.2 Napařování (Evaporation)	17
2.2 CVD Povlakování	18
3 DRUHY POVLAKŮ.....	19
3.1 Pvlaky 1. generace	19
3.2 Pvlaky 2. generace	19
3.3 Pvlaky 3. generace	19
3.4 Pvlaky 4. generace	20
3.5 Multivrstevné pvlaky	20
4 TECHNOLOGICKÁ PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU	21
4.1 Mechanické čištění nástroje (Úprava řezných hran)	21
4.2 Chemické čištění	22
4.3 Iontové čištění.....	22
4.4 Stripping.....	22
5 ZKOUŠENÍ POVLAKŮ	24
5.1 Tvrdost pvlaku	24
5.2 Tloušťka pvlaku	25
5.3 Adheze a koheze pvlaku.....	25
5.4 Kluzné vlastnosti povrchu	27
5.5 Drsnost pvlaku.....	27

5.6 Odolnost povlaku proti oxidaci	27
5.7 Tepelná stabilita povlaku	27
6 POVLAKOVÁNÍ VE FIRMĚ SHM	28
6.1 Charakteristika zvolených povlaků	28
6.2 Příprava substrátu	29
6.2.1 Mechanické čištění	29
6.2.2 Chemické čištění	30
6.3 Powlakování	31
7 TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ POVLAKŮ	32
7.1 Zkoušení povlaku na adhezi a kohezi	32
7.2 Tvrdost povlaků	33
7.3 Tloušťka povlaků	34
7.3.1 Powlak SHM1	35
7.3.2 Powlak SHM2	36
7.4 Chemické složení povlaků	36
7.4.1 Powlak SHM1	37
7.4.2 Powlak SHM2	38
ZÁVĚR	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	42

ÚVOD

Technické vědy slouží ku prospěchu lidstva již od samého počátku. Přispívají k ulehčení každodenního života člověka. Největší nástup technologií přišel za průmyslové revoluce v 18. a 19. století, kdy stroje zaplavily továrny, pole i cesty a nahradily tak řemeslnou a manuální výrobu. Strojírenská technologie se neustále vyvíjí a je stále na vzestupu. Vynálezy a produkty tohoto vědního odvětví se staly nedílnou součástí dnešní doby.

V dnešní době podniky na celém světě využívají pro výrobu strojních součástí mnohé technologické postupy. Mezi nimi i různé metody obrábění, z nichž největší podíl zaujímá soustružení, frézování a vrtání.

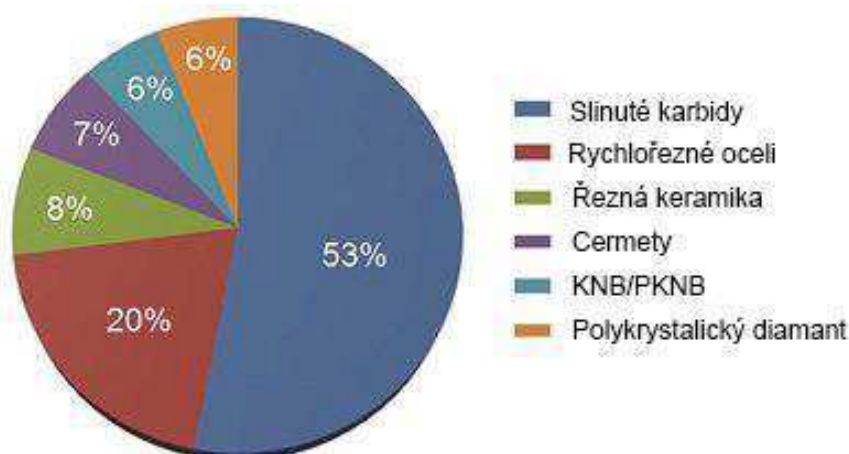
Současně s rozvojem strojů je také nutné rozvíjet i řezné nástroje. Hlavní důraz je kladen na kvalitu, ale i cenu výrobku. Proto je velmi důležité zajistit efektivní technologii pro správné odebrání třísky, rychlost obrábění i dodržení požadovaných tvarů, rozměrů a jakostí. Stále častěji je aplikovaná metoda vysokorychlostního obrábění. Řezný nástroj by tak měl mít břit s odpovídající houževnatostí a současně i velkou tvrdostí, která by měla vydržet i při vysokých pracovních teplotách. Vysoké tvrdosti břitu lze dosáhnout aplikací vhodných povlaků. Slinutý karbid zajišťuje důležitou houževnatost a nanesený povlak zajišťuje tvrdost a ořezuvzdornost. Na poli povlaků dochází neustále k vývoji nových vrstev s menší tloušťkou a lepšími mechanickými a fyzikálními vlastnostmi.

Tato bakalářská práce pojednává v rešeršní části o materiálech, z kterých jsou dnešní řezné nástroje vyráběny, o metodách povlakování a analýze těchto povlaků.

Ve spolupráci s firmou SHM s.r.o. bylo provedeno napovlakování dvou vyměnitelných břitových destiček, které byly následně podrobeny testování jejich fyzikálních vlastností.

1 MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

V současné době se pro obrábění využívá řezných nástrojů vyrobených z různých druhů materiálů. Tyto materiály jsou například nástrojové oceli, slinuté karbidy, cermety, řezná keramika, ale i syntetický diamant a kubický nitrid bóru. Na obrázku 1.1 je procentuálně znázorněno využívání těchto materiálů [1].



Obr. 1.1 Přehled nástrojových materiálů v současnosti [1].

Nástroje jsou během obrábění vystaveny vysokému mechanickému a tepelnému namáhání. Kvůli tomuto zatěžování dochází k rychlému či pomalému opotřebení. V nejhorších případech dochází až k jejich zlomení či jinému zničení. Z tohoto důvodu je nezbytné vybrat vhodný druh materiálu řezného nástroje pro dané řezné podmínky, typ obrábění a materiál obráběného polotovaru.

Pro zvýšení životnosti řezného nástroje se provádí kromě vhodného výběru materiálu i povlakování nástrojů. V současné době mezi nejvíce využívané metody povlakování patří CVD, PVD a jejich modifikace [1].

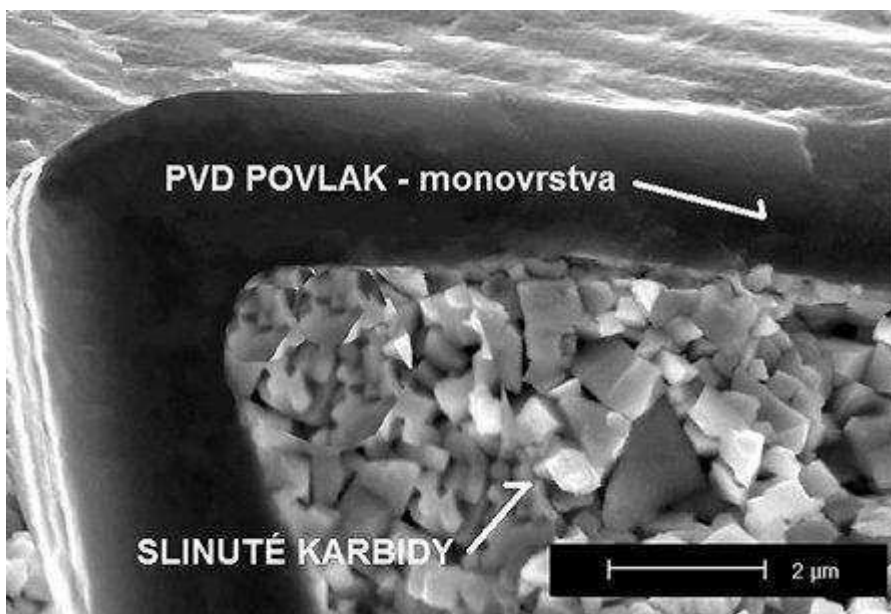
1.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli se řadí mezi konvenční nástroje. Dnešní užívané nástrojové oceli se můžou rozdělit na slitinové a rychlořezné oceli. Nástrojové oceli vynikají vysokou houževnatostí, avšak jejich nedostatkem je nízká tvrdost, odolnost proti opotřebení a s tím související nízká řezivost. Rychlořezné oceli se stále využívají i navzdory nedostatkům, především díky nízké pořizovací ceně a vysoké houževnatosti proti ostatním nástrojovým materiálům. Díky povlakování navíc můžeme zvýšit jejich nízkou tvrdost a tím i řeznou rychlost [2].

1.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy obsahují tvrdé částice (karbidy), které jsou k sobě vázány pomocí kovového pojiva, obvykle kobaltu. Nástroje se vyrábějí práškovou metalurgií. Oproti nástrojovým ocelím jsou daleko tvrdší, mají vyšší odolnost proti opotřebení, řeznou

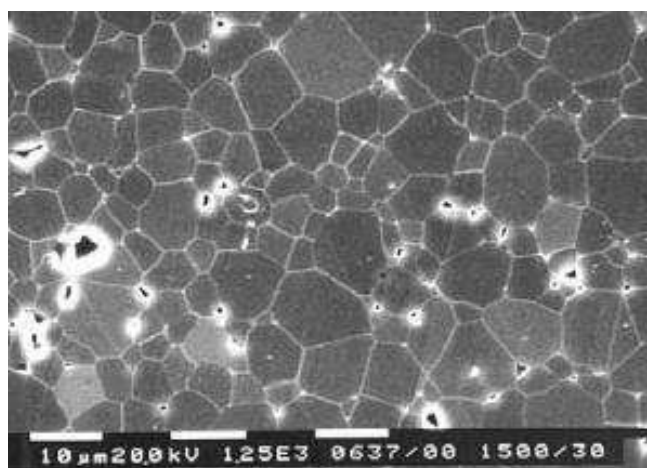
rychlost a životnost. Povlakované slinuté karbidy lze považovat za jednoduché kompozitní materiály, jsou totiž složeny z pevného a celkem houževnatého karbidového středu a termo-chemicky stabilního, tvrdého povlaku. V dnešní době se povlakuje přibližně 85-90%. Tímto způsobem získáme řezné materiály pro širokou škálu aplikací [1, 3, 4].



Obr. 1.2 Detail povlakovaného břitu frézy [3].

1.3 Řezná keramika

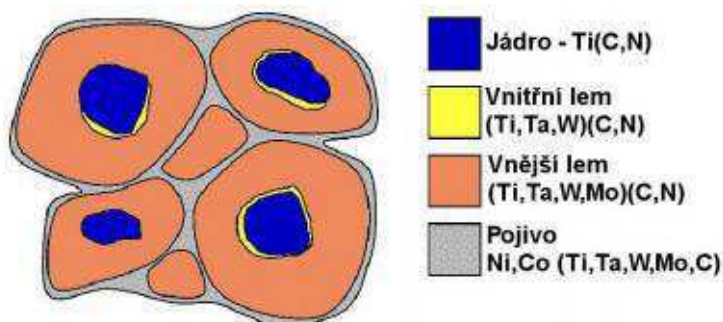
Tutu skupinu představují nekovové anorganické materiály. Mezi výhody řezné keramiky patří vysoká tvrdost za tepla, excelentní chemická stabilita a nízká afinita ke kovům. Struktura řezné keramiky je zachycena na obrázku 1.3. Avšak na druhou stranu jsou citlivější k tahovým a ohybovým složkám napětí. Při zpevnění vlákny (whiskery) jde o nejodolnější materiál pro obrábění superslitin a často se využívá i na obrábění šedé litiny. Využívá se především pro vysokorychlostní obrábění bez procesní kapaliny. Keramika zvládá teploty až 1200 °C. Jelikož má nižší součinitel tepelné vodivosti, nepřijímá tak teplo z obrobku, a odvádí ho pouze za pomoci třísky [1].



Obr. 1.3 Řezná keramika Al₂O₃ [4].

1.4 Cermety

Název vznikl složením prvních tří písmen ze slov “**CER**amics (keramika)” a “**MET**al (kov) “. Název měl vyjadřovat nástrojový materiál, který má vysokou tvrdost řezné keramiky (2 000 až 2500 GPa) a vysokou houževnatost kovu. Přestože se však tato očekávání zcela nepotvrdila, název přetrval dodnes. (V odborné literatuře se pak tento materiál může označovat i jako slinuté karbonitridy nebo bezwolframové slinuté karbidy.) Charakteristickou vlastností cermetů je nízká měrná hmotnost, která je oproti slinutým karbidům zhruba poloviční. Je to dáno tím, že materiál neobsahuje těžké karbidy wolframu, proto i název bezwolframové slinuté karbidy. Hlavní výhodou cermetů je jejich vysoká tvrdost i za zvýšených teplot, jsou levnější než slinuté karbidy, mají vyšší chemickou stabilitu a odolnost proti oxidaci a tvorbě nárůstku. Nevýhodou je pak nízká houževnatost. Využívají se především pro dokončovací operace při obrábění ocelí. Na obrázku 1.4 je znázorněna struktura cermetů [4].



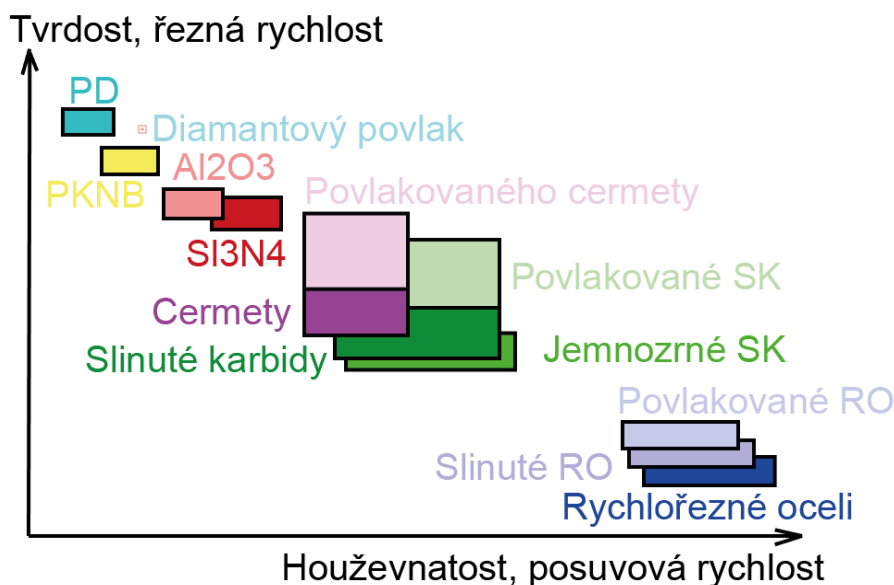
Obr. 1.4 Struktura cermetu – schéma [4].

1.5 Supertvrdé materiály

Mezi supertvrdé materiály patří kubický nitrid boru a diamant. Využívají se hlavně pro obrábění skla, kevlaru, uhlíku, hliníkových slitin atd. Jelikož při teplotách nad 800 °C se mění na grafit, musí se používat pro obrábění za nízkých procesních teplot. Dlouhou dobu byl problém u těchto nástrojů vytvořit účinný utvařecí třisek. Nyní se i za pomoci galvanických metod a zejména PVD procesy, nanáší diamantový povlak. Toto tvoří technologii pro broušení nástrojů ze slinutých karbidů nebo ochranu nástroje pro obrábění lehkých slitin. Pro některé nástroje se pak trvanlivost počítá až na roky i při třísměnném provozu. Průmyslový diamant je vyráběn z velmi čistého grafitu. Působením vysoké teploty a tlaku se hexagonální mřížka transformuje na mřížku kubickou [1, 4].

2 METODY POVLAKOVÁNÍ

V dnešní době stále roste procento využívání těžkoobrobitelných materiálů. Tento trend se odráží na vyšším využití povlakovaných nástrojů, ale i nutnosti vhodné volby optimální geometrie břitu a optimálního tvaru utvařeče třísek [5].



Obr. 2.1 Oblasti použití řezných materiálů – podle [4].

Jak je patrné z obrázku 2.1, tak v dnešní době se povlakuje více druhů materiálů řezných nástrojů. Je to způsobeno faktem, že povrch má významné funkční vlastnosti. Jeho úpravou modifikujeme tyto vlastnosti a tím i vlastnosti celku, jelikož zatížení se dostává do součásti právě přes jeho povrch. Mezi hlavní faktory zařadíme tvorbu trhlin, která má počátek na povrchu a následně se šíří do materiálu. Dále tření, které je dáno drsností povrchu. Větší odolnost proti vysokým teplotám a v neposlední řadě odolnost materiálu proti korozi [2, 5]

Ke kladům povlakovaných nástrojů patří snížení potřeby použít procesní kapalinu, nižší výrobní náklady, lepší kvalita opracování, vyšší produktivita a přesnost výroby. Taktéž se povlaky významně podílejí na zamezování tvorby nárůstku na břitu nástroje, díky nižšímu koeficientu tření. [5].

Povrch tělesa tvořený povlakem má odlišné fyzikální vlastnosti od vnitřního základního materiálu, na který se povlak nanáší. Jedná se o velmi tenkou vrstvu materiálu (zpravidla několik mikrometrů) o vysoké tvrdosti a vynikající odolnosti proti opotřebení. Těchto vynikajících výsledků je možné dosáhnout zejména díky absenci pojiva, jemnější zrnitosti a méně strukturních defektů v povlakovaném materiálu, ve srovnání se substrátem [5].

Metody povlakování lze rozdělit na dvě hlavní varianty PVD a CVD, jejich hlavní parametry jsou zaznamenány v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Porovnání metod PVD a CVD – podle [5].

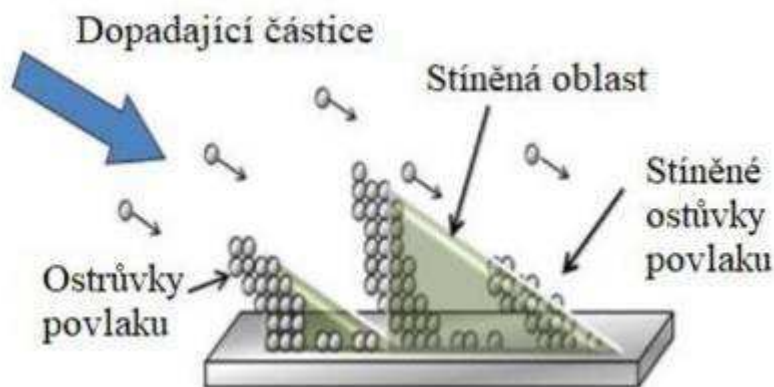
Porovnání metod PVD a CVD			
Charakteristika	PVD		CVD
	Napařování	Naprašování	
Mechanismus tvorby materiálu povlaku	tepelná energie	přenos pohybové energie	chemická reakce
Teplota povlakování [°C]	<500		700 ÷ 1 200
Doba trvání povlakovacího cyklu	kratší		delší
Původní určení pro	nástroje z rychlořezných ocelí		nástroje z SK
První aplikace pro řezný nástroj	Začátek 80.let 20.století		konec 60./20.let
První materiál povlaku	TiN		TiC
Tloušťka povlaku [μm]	(1) 2 ÷ 4 (7)		(3) 5 ÷ 10 (13)
Čištění povrchu substrátu	složitější		jednodušší
Rychlost povlakování [\AA min^{-1}]	může být velmi vysoká, až 750 000	nízká, s výjimkou povlaků z čistých kovů (např. 10 000 u Cu)	Střední 200 ÷ 2 500
Rovnoměrnost pokrytí	Špatná v přímočarém směru (ne při rozptylu plynu)	dobrá, s nerovnoměrným rozložením tloušťky	dobrá
Stínový efekt => nutný pohyb substrátu	ano		ne
Napovlakování ostré hrany	ano		obtížné
Deponované částice	atomy a ionty		atomy
Energie deponovaných částic [eV]	Nízká (0,1 ÷ 0,5)	vysoká (1 ÷ 100)	může být vysoká u metody PACVD
Bombardování substrátu nebo povlaku			možné
Narušování povrchu rostoucího povlaku	běžně ne	ano	ano (otěrem)
Nanášení kovů	ano		
Nanášení kovových slitin			
Nanášení těžkovatelných sloučenin			
Ohřev substrátu (externími prostředky)	ano, běžně	zpravidla ne	ano
Ovlivnění mech. vlastností substrátu	menší		větší
Zbytkové napětí povlaku	tlaková		tahová
Energetická náročnost	nízká		vysoká
Negativní vliv na okolní prostředí	ne		ano

2.1 PVD Povlakování

PVD – Physical Vapour Deposition, v překladu fyzikální napařování, je metoda která probíhá za nízkých teplot – pod 500 °C a za sníženého tlaku (0,1 ÷ 1,0 Pa). Metoda byla původně využívána pro povlakování rychlořezných materiálů, jelikož díky nízké teplotě nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu, a navíc je možno tímto způsobem povlakovat i ostré hrany. Nyní je však vysoce využívána již i pro slinuté karbidy [2].

Princip PVD povlakování spočívá v kondenzaci částic atomů či shluků atomů, které jsou uvolňovány ze zdroje (terče, targety) fyzikálními metodami – rozprašování (většinou urychlenými ionty Argonu, vytvářenými ve zkříženém elektromagnetickém poli) nebo odpařování (indukčně, nízkonapěťovým obloukem, laserem nebo elektronovým paprskem), některé metody využívají i klasický odporový ohřev. Uvolněné částice jsou ionizovány, reagují s atmosférou komory, kterou tvoří inertní a

někdy případně i reaktivní plyn (např. Ar, N₂). Záporným předpětím (řádově stovky voltů) jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde se usazují ve formě tenké vrstvy homogenního povlaku. Je nutno pohybovat předměty, které se povlakuji, aby bylo zaručeno rovnoměrného povlaku po celém povrchu. Požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem zachyceným na obrázku 2.2, který způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic, se vytváří nedokonalá vrstva povlaku, případně se povlak vůbec nevytvoří [5].



Obr. 2.2 Stínový efekt [6].

2.1.1 Naprašování (Sputtering)

Metoda naprašování probíhá za vakua nebo za nízkého tlaku plynu (<0,7 Pa). Katoda neboli terč, je umístěn do vakuové komory. Terč je vyroben z vodivého materiálu, který bude nanášen. Eroze terče se počítá podle rovnice 2.1. Následně se do komory přes jehlový ventil připouští pracovní plyn (obvykle argon). Odprášené částice se dostanou na povrch povlakovaného tělesa, aniž by se srazily s molekulami plynu. Tímto způsobem povlakování můžeme získat povlak z těžkovatelných materiálů, a to při nižších teplotách, než u odpařovacího procesu [5,7].

Rychlost eroze terče lze vyjádřit pomocí vztahu [5]

$$R = 62,3 \cdot \frac{J \cdot S \cdot m_t}{\rho} [\text{\AA} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde	J	[mA · cm ⁻²]	-	proudová hustota iontů,
	S	[atomy/iont]	-	výtěžnost naprašování,
	m_t	[g]	-	atomová hmotnost,
	ρ	[g · cm ⁻³]	-	měrná hmotnost materiálu terče.

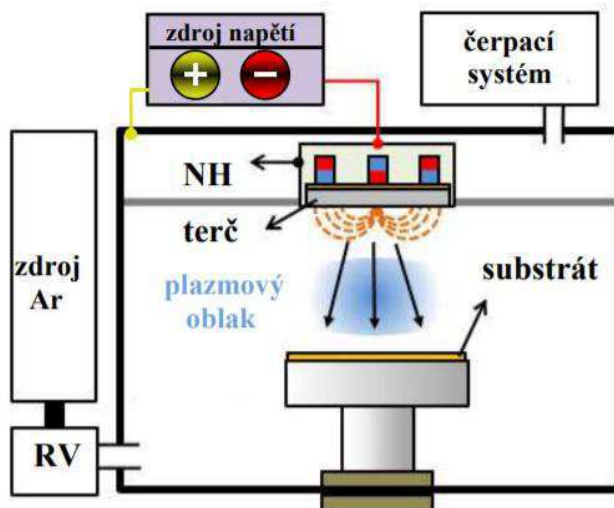
2.1.1.1 Naprašování doutnavým výbojem rovinné diody (Planar Diode Glow Discharge Sputter Deposition)

Jedná se o nejjednodušší systém naprašování. Při tomto typu je terč, chlazený pomocí vody, umístěn ve vakuové komoře a je přiveden na vysoký záporný

potenciál, řádově tisíc voltů. Do komory se přivede plyn, většinou argon a tlak se udržuje na hodnotě řádově jednotky pascalu. Před terčem se zapálí doutnavý výboj, přičemž kladné ionty bombardují záporný terč a záporné elektrony dopadají na uzemněnou kostru komory. Těžké ionty svým dopadem rozprašují terč a rozprášené atomy se usazují na vnitřních površích. Substráty se umísťují před terč, tenká vrstva tedy vzniká především na nich. Metoda je široce využívána pro svoji rychlost, avšak mezi její nevýhody patří dlouhé doby procesu a ohřívání substrátu vlivem výboje. Zjednodušené schéma je znázorněno na obrázku 2.3 [5].

2.1.1.2 Magnetronové naprašování (Magnetron Sputtery Deposition)

Při této metodě je před terčem vytvořeno magnetické pole definovaného tvaru elektromagnetem nebo permanentními magnety. Toto zařízení se nazývá magnetron. Pokud je síla vnitřních a vnějších magnetů přibližně stejná, jde o vyvážený magnetron. Zde je magnetické pole navrženo tak, aby drželo elektrony, a tedy i plazmu v nejbližším okolí terče. Tento princip se využívá pro mikroelektronické aplikace. Pokud je jeden z magnetů silnější než druhý, pak jde o nevyvážený magnetron. Ten využívá samostatné iontové dělo pro seřízení sekundární plazmy poblíž substrátu. Elektrony, které při klasickém naprašování unikají z prostoru před terčem, se v tomto případě v důsledku Lorentzovy síly musí pohybovat po šroubovici podél siločar. Tak se výrazně prodlužuje jejich dráha v blízkosti terče, prodlužuje se i doba jejich setrvání v oblasti výboje a zvyšuje se pravděpodobnost ionizace dalších atomů pracovního plynu. To umožňuje udržet výboj při nižším tlaku (řádově desetiny pascalu) i při nižším napětí (řádově stovky voltů). Zejména nižší tlak se pozitivně projevuje ve větší čistotě vytvářených vrstev. Této metoda lze využít i u nevodivých terčů použije-li se střídavý vysokofrekvenční signál [5,7].



Obr. 2.3 Schéma naprašovacího procesu [8].

2.1.1.3 Radiofrekvenční naprašování (Radio Frequency Sputter Deposition)

Tato metoda se využívá především k nanášení pomocí terčů z nevodivého materiálu, ze kterého nelze získávat materiál přiložením stejnosměrného proudu, v důsledku akumulace elektrického náboje na jejich povrchu. Využívá se zde vysokofrekvenčního signálu, kterým je vybudena plazma [5].

2.1.1.4 Naprašování iontovým paprskem (Ion Beam Sputter Deposition)

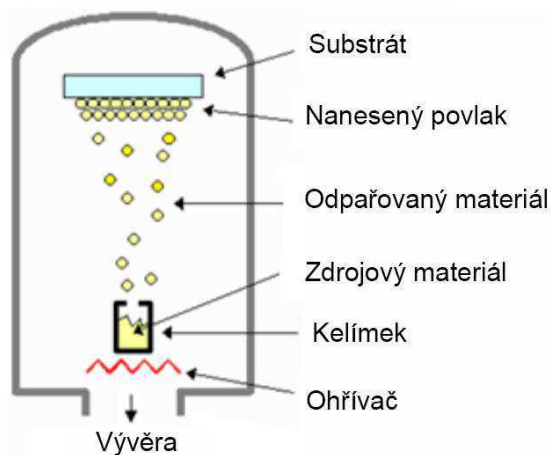
Postup metodou naprašování iontovým paprskem zajišťuje vynikající adhezi, vysokou čistotu povlaku a velmi nízký ohřev substrátu. Iontový paprsek o vysoké energii je vytvořen v iontovém zdroji a je namířen na terč z požadovaného materiálu. Zdrojem iontového paprsku je inertní nebo reaktivní plyn. Substrát zachytává složky odprášené z terče a lze řídit jeho teplotu nezávisle na okolí. Ionty ze zdroje jsou buď nasměrovány na terč a odprášený materiál se ukládá na substrátu ve formě tenkého povlaku (odprašování iontovým paprskem) nebo jsou ionty ze zdroje nasměrovány na substrát, který je povlakován materiálem generovaným nějakým nezávislým způsobem (depozice za asistence iontového paprsku) [2,5].

2.1.2 Napařování (Evaporation)

Během napařovacích procesů se terče zahřívají a tím se materiál odpařuje. Může se jednat o kapalnou fázi (dochází k varu) nebo fázi pevné (dochází ke sublimaci). Tyto páry následně kondenzují na chladnějším povrchu substrátu. Tento proces probíhá za vakua spolu s přidávným plynem (např. Argon), který zajistí rovnoměrný povrch povlaku. Zjednodušené schéma procesu je zachyceno na obrázku 2.4 [5].

2.1.2.1 Napařování za pomoci odporového ohřevu

Nejjednoduššími odporovými zdroji jsou vyhřívané dráty a kovové fólie různého typu. Jsou dostupné v různých velikostech a tvarech, jejich cena je nízká, a proto mohou být po provedení jednoho experimentu v případě potřeby vyřazeny. Obvykle jsou vyráběny z kovů, které mají vysokou teplotu tavení a nízký tlak par, takže nekontaminují vytvářený povlak [2].



Obr. 2.4 Schéma napařování [9].

2.1.2.2 Obloukové napařování

Technologie využívající katodické obloukové systémy. Ty mohou být pulzní (oblouk se opakovaně zapaluje a zhasíná pomocí kondenzátoru) nebo kontinuální. Výhodou pulzních systémů je, že terč se mezi jednotlivými cykly nachází v chladném stavu. Nevýhodou pak je pokles rychlosti. U kontinuálních systémů je výhodou jednoduchost konstrukce a využití celého terče. Avšak dochází k tvorbě mikročástic, které znečišťují povlak [5].

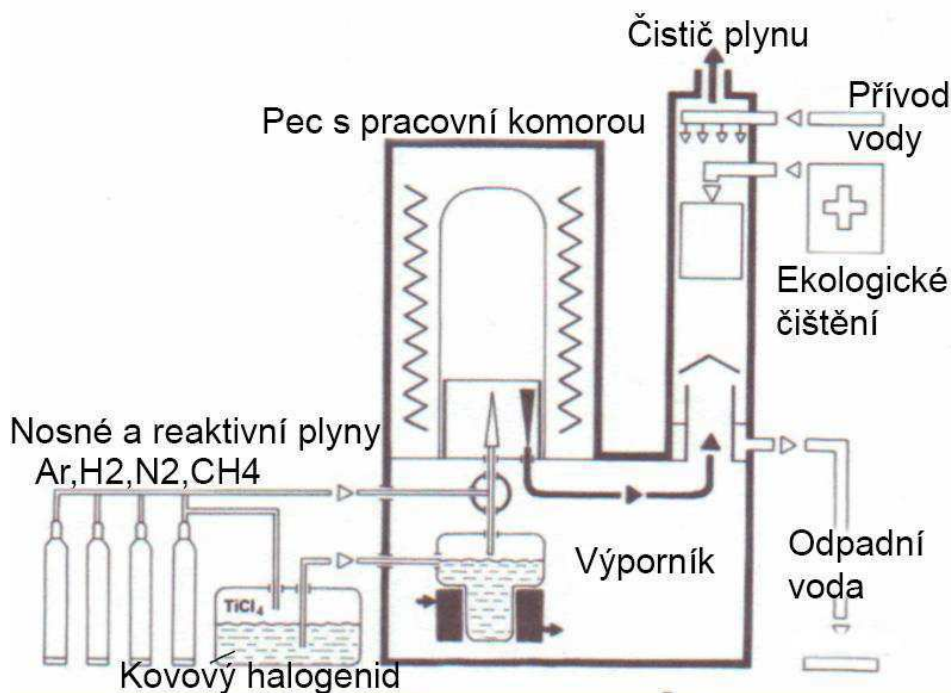
2.2 CVD Povlakování

CVD – Chemical Vapour Deposition, v překladu Chemická depozice vrstev. Jedná se o chemický proces povlakování, který je založen na reakci plyných chemických sloučenin v plazmě, která se tvoří v bezprostřední blízkosti povrchu podkladu. Je zapotřebí, aby použitý plyn obsahoval stabilní, ale přitom prchavou sloučeninu, která se vlivem přivedené energie chemicky rozkládá (např. TiCl_4 , AlCl_3). Následné produkty rozkladu plynu se ukládají na ohřátý povrch povlakovaného předmětu, kde působí jako katalyzátor. Obrázek 2.5 znázorňuje schéma CVD povlakování [5].

V poslední době se používají různé modifikované CVD metody, jako např.:

- Nízkotlaková CVD metoda,
- CVD se žhavicím vláknem,
- laserem indukovaná CVD metoda,
- metoda CVD s lavinovým plazmatickým výbojem.

Mezi hlavní výhody povlakování metodou CVD patří vysoká hustota povlaku, vysoká teplotní stabilita povlaku, rovnoměrná tloušťka u tvarově složitých nástrojů, relativně nízké pořizovací a provozní náklady. Nevýhody pak jsou vysoké pracovní teploty, dlouhý pracovní cyklus (8÷10 hodin), ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi. A dále že není možné touto metodou napovlakovat ostré hrany a vytvořit povlaky různých typů kovů, jako např. TiAlN [5,10].



Obr. 2.5 Schéma CVD povlakování [11].

3 DRUHY POVLAKŮ

Zavedení vyměnitelných břitových destiček s tenkými povrchovými vrstvami patří mezi nejdůležitější vývojové stupně v průmyslu slinutých karbidů. První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu pro obrábění se na trhu objevily koncem 60. let 20. století. Jednalo se o povlak TiC s tloušťkou vrstvy 4-5 μm . Povlak byl se špatnou soudržností podkladu a povrchu, která byla způsobena nedokonalou technologií výroby, během které docházelo ke tvorbě křehkého eta-karbidu, který způsoboval loupání povlaku. Brzy nato byly vytvořeny povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al_2O_3 . V současné době je kvůli rostoucím požadavkům každoročně vyvíjeno a zdokonalováno mnoho nových druhů povlakovaných karbidů. Jednotlivé materiály se navzájem liší druhem povlaku, kombinací vrstev a tloušťkou povlaku, metodou povlakování, substrátem atd [4].

3.1 Pvlaky 1. generace

Tyto povlaky se v dnešní době již moc nevyužívají. Jedná se o jednovrstvé povlaky, které mají téměř výhradně chemické složení TiC. Jejich tloušťka je kolem 6 μm a mají špatnou soudržnost podkladu a povlaku. To je zapříčiněno eta-karbidem mezi povlakem a substrátem, který vzniká špatnou technologií. Při obrábění dochází k loupání a tím znehodnocení nástroje [4, 5, 12].

3.2 Pvlaky 2. generace

Jedná se opět o jednovrstvé povlaky, jako u povlaků 1. generace. Ale tyto povlaky mají už i jiné chemické složení než jen TiC (jedná se o TiCN a TiN). Díky zdokonalení technologie nedochází ke tvorbě eta-karbidů. Tato vylepšená technologie tak dovoluje tvorbu povlaků o větší tloušťce (7-10 μm) a to i bez nebezpečí jejich odlupování. Do této generace patří např. povlakované slinuté karbidy Pramet, typ 015 P, 020 P [5, 12].

3.3 Pvlaky 3. generace

Povlaky třetí generace jsou vícevrstvé povlaky, které mají běžně dvě až tři vrstvy, případně i více. Tyto vrstvy mají ostře ohraničené přechody. Vrstvy se řadí podle jejich schopností. První jsou s nejlepší přilnavostí ke substrátu, a jako poslední jsou vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost, ale dosahují vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení a oxidaci (dobrá přilnavost k předchozí vrstvě je dána procesem povlakování). Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí (od povlaku k povrchu): TiC- Al_2O_3 , TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC- Al_2O_3 -TiN. Povlaky této generace mají např. slinuté karbidy Pramet Tools 5026 [5, 12].

3.4 Povlaky 4. generace

Jedná se o speciální vícevrstvý, „multivrstvý“ povlak, velmi často složený z více než deseti vrstev a mezivrstev s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Tyto vrstvy jsou ze stejných materiálů jako povlaky třetí generace. Multivrstvé povlaky jsou tvořeny u metody CVD pomocí cíleného řízení atmosféry v povlakovacím zařízení. U PVD metody, odpařováním různých typů target. Mezi povlaky čtvrté generace se též řadí diamantové, nanokompozitní, gradientní, supermřížkové. Do této generace patří např. povlaky Marwin MT a Marwin SI firmy SHM, s. r. o [5, 12].

3.5 Multivrstevné povlaky

Tento typ povlakování je založen na principu pravidelného střídání dvou typů vrstev s odlišnými fyzikálními vlastnostmi. Střídání jednotlivých vrstev jde zřetelně vidět na obrázku 3.1. Tloušťky těchto jednotlivých monovrstev se pohybují kolem 10nm. Fyzikální vlastnosti výsledné multivrstvy jsou značně odlišné od vlastností homogenní monovrstvy stejného průměrného složení [12].



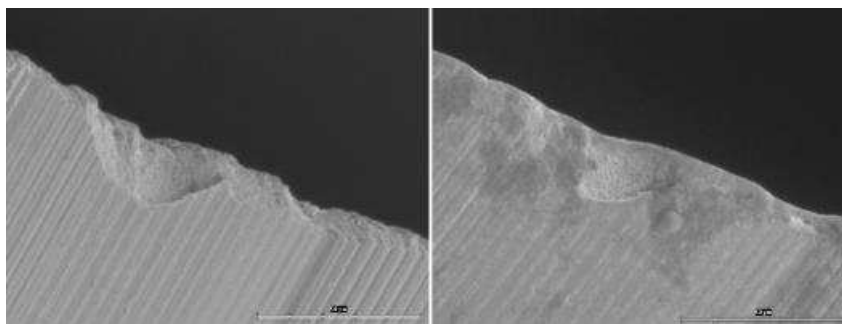
Obr. 3.1 Multivrstvý povlak firmy Valenite, obsahující 62 alternujících vrstev TiN/TiCN (každá o tloušťce 50nm) [13].

4 TECHNOLOGICKÁ PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU

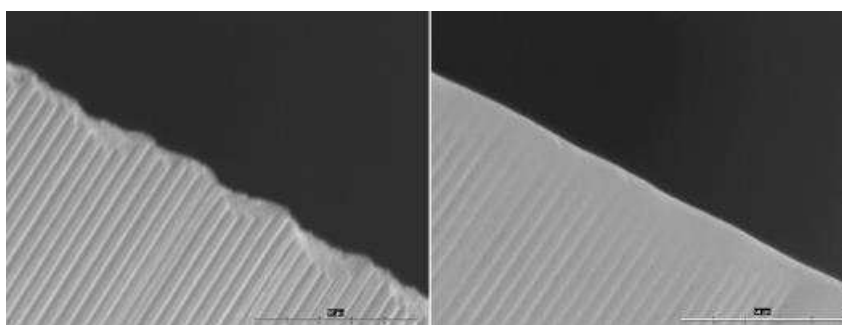
Pro výdrž povlaku na substrátu a celkovou životnost daného řezného materiálu, je důležitá vhodná příprava podkladu pro povlak. Po slinování se nástroje brousí, z tohoto procesu zůstávají hrany otřepené a mohou se i objevovat rýhy. Uvedené nedostatky následně způsobí odlupování povrchu. Z tohoto důvodu je zapotřebí nástroj důkladně připravit před povlakováním [5].

4.1 Mechanické čištění nástroje (Úprava řezných hran)

Hrany nástrojů jsou po broušení plné defektů. To se týká hlavně nástrojů ze slinutého karbidu. Ostré hrany mohou být často koncentrátorem napětí a způsobit porušení povlaku ještě před použitím nástroje. Proto se hrany nástrojů speciálně omílají, kartáčují, honují nebo otryskávají. Toto celkové snížení drsnosti vede k podstatnému zvýšení životnosti nejen hran ale i celé funkční plochy. Jde o změny na mikrogeometrii v řádech maximálně mikrometrů (obvykle cca do 10 μm) a může být dosaženo zvýšení životnosti nástroje až o 200 %. Na obrázku 4.1, 4.2 je zachycen stav hran nástroje před a po úpravě tvrdým a měkkým abrazivem [14, 15].



Obr. 4.1 Řezná hrana před a po úpravě tvrdým abrazivem [14].



Obr. 4.2 Řezná hrana před a po úpravě měkkým abrazivem [14].

Otryskávání se provádí proudem vzduchu, kterým je unášeno jemné abrazivo. Částice dopadají na povrch nástroje rychlostí okolo 700 km/h. Tímto dochází k abrazivnímu opotřebení, jehož rozsah závisí na mnoha faktorech jako je rychlost a úhel dopadu částic, jejich hmotnost a tvar. Jako abraziva se používají:

- Přírodní toxiny (hlavně minerální abraziva),
- kovová abraziva (např. broky),

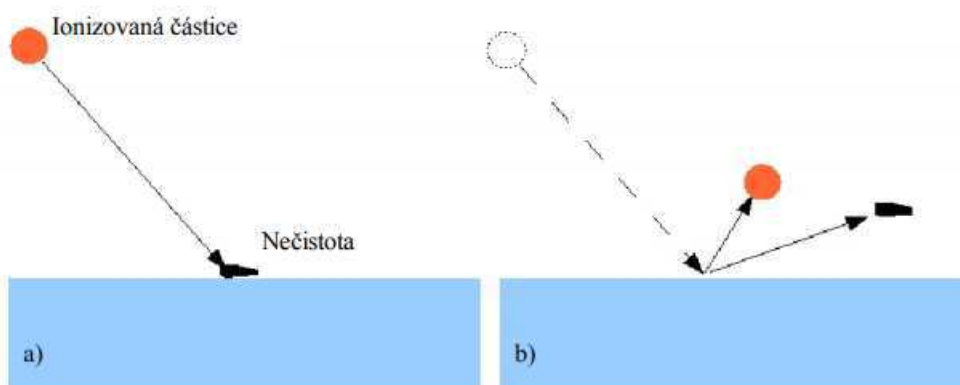
- struska,
- syntetická abraziva,
- diamantový prášek [15].

4.2 Chemické čištění

Během chemického čištění se zbavuje povrch zejména organických nečistot jako mastnoty, ale i brusiva a dalších pevných částic ulpělých na povrchu, které se nepodařilo zcela odmagnetovat. Pro čištění se užívá různých alifatických uhlovodíků (alkoholy na ropné bázi a mastné kyseliny). A aromatické uhlovodíky (jako toluol, benzen, xyloxy a jiné). Tyto rozpouštědla jsou extrémně hořlavá a toxická. Ke zvýšení účinků rozpouštědel se ještě využívá ultrazvuk. Nutné je dát pozor na uložení nástrojů, které se nesmí vzájemně dotýkat. Po chemickém čištění následuje vysušení za použití vakuové sušičky [15].

4.3 Iontové čištění

Iontové čištění nebo také iontový bombard či iontový etching. Principem je přivedení záporného předpětí na substrát a dopad tímto předpětím urychlených iontů. Ionty při dopadu na substrát odrážejí mikronečistoty. Tento proces má dvě fáze. V první fázi dochází k ionizaci atomů plynu (např. Argon), který se následně vpouští do komory. Této fázi se říká čištění doutnavým výbojem. V druhé fázi zvané čištění nízkonapětovým elektrickým obloukem, pokračuje čištění vypuštěním komory a přiložením nízkonapětového zdroje elektrického oblouku na depoziční katody. Zde se vytváří katodová skvrna, která je následně zdrojem iontů, které jsou opět záporným napětím urychlovány na substrát. Dopadem těchto iontů je povrch očištěn. Princip je znázorněn na obrázku 4.3 [14].

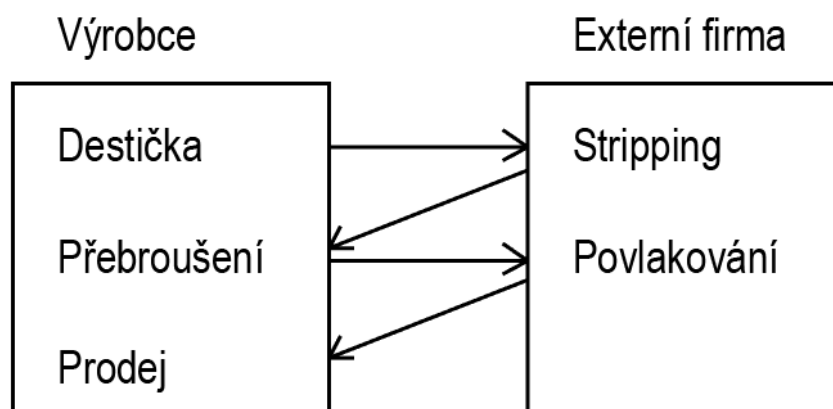


Obr. 4.3 Princip iontového čištění [14].

4.4 Stripping

Stripping znamená stahování starých povlaků u přebrušovaných nástrojů, jednodušeji řečeno, je to označení pro odstranění staré vrstvy, z již použitého nástroje před depozicí nové vrstvy. Nástroj je nejprve zbaven původního povlaku, přeostrěn a následně znovu napovlakován. Stripping se provádí chemickou a elektrochemickou cestou. Používá se pro něj silných oxidačních činidel či účinků

elektrického proudu. Je značný rozdíl, jestli se jedná o stripping nástrojů z rychlořezné oceli (HSS) nebo nástrojů ze slinutých karbidů (SK). Pro aplikaci na HSS (High speed steel) se využívají roztoky peroxidu vodíku, vody a tetrannatriumdifosfátu za teplot kolem 70 °C. Jedná se tedy o reakci s horkým peroxidem. Odstraňování povlaků z SK nástrojů je více komplikované, jelikož se v materiálu vyskytuje kobalt v rozmezí 6-12 %. Kobalt velmi citlivě reaguje na kyselé i zásadité prostředí, může dojít k vyleptání kobaltu a tím k narušení struktury. I při této technologii se využívá peroxidu vodíku, ovšem v nižší koncentraci a většinou jen za pokojových teplot. U obou technologií je následně bezprostředně po strippingu nutné povrch opláchnout. Existují i alternativní postupy jako například elektrochemické. Jedná se o finančně náročnější proces, jelikož stripping provádí stejná firma, která provádí i povlakování, ale broušení se provádí u výrobce destiček. Je tedy nutné zařídit převoz nástrojů od výrobce na stripping, následně převézt nástroj k výrobcí na přebroušení a opět zavést do firmy na povlakování. Schéma cesty nástroje je znázorněna na obrázku číslo 4.4 [15, 16].



Obr. 4.4 Schéma cesty nástroje.

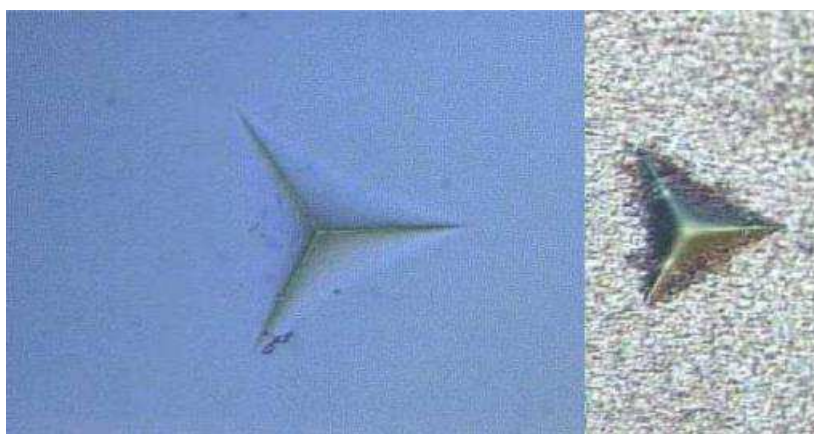
5 ZKOUŠENÍ POVLAKŮ

V dnešní době je nabízeno široké spektrum vrstev. Použití a způsob opotřebení nástroje zásadně ovlivňuje volbu povlaku s ohledem na jeho fyzikální a chemické vlastnosti, kterými je každý povlak charakterizován. Jedná se o široký soubor základních vlastností a parametrů, které se zkouší a na základě těchto zkoušek se vyhodnocuje kvalita a vhodnost povlaku. Mezi základní fyzikální vlastnosti vrstev patří tvrdost, tloušťka, drsnost, adheze a kluzné vlastnosti. Nejdůležitějšími chemickými vlastnostmi jsou odolnost vůči oxidaci, chemická a tepelná stabilita [5].

5.1 Tvrdost povlaku

Tvrdost je definována jako „odolnost pronikání cizích předmětů“. Jde tedy o mechanickou vlastnost materiálu, která se vyjádří jako odpor vůči deformaci povrchu, vyvolané působením geometricky definovaného tělesa, které je definovanou silou vtlačováno do materiálu. Hodnota tvrdosti závisí na komplexních vlastnostech povrchu zkoušeného materiálu a na zkušebních podmínkách, za kterých je zjišťována. Běžný způsob opotřebení nástrojů je dán abrazivním otěrem. Právě proto je vysoká tvrdost základním parametrem otěruvzdorných vrstev. Mezi vrstvy s vysokou tvrdostí patří diamantové vrstvy, vrstvy s obsahem bóru a nanokrystalické nanokompozity [5,17].

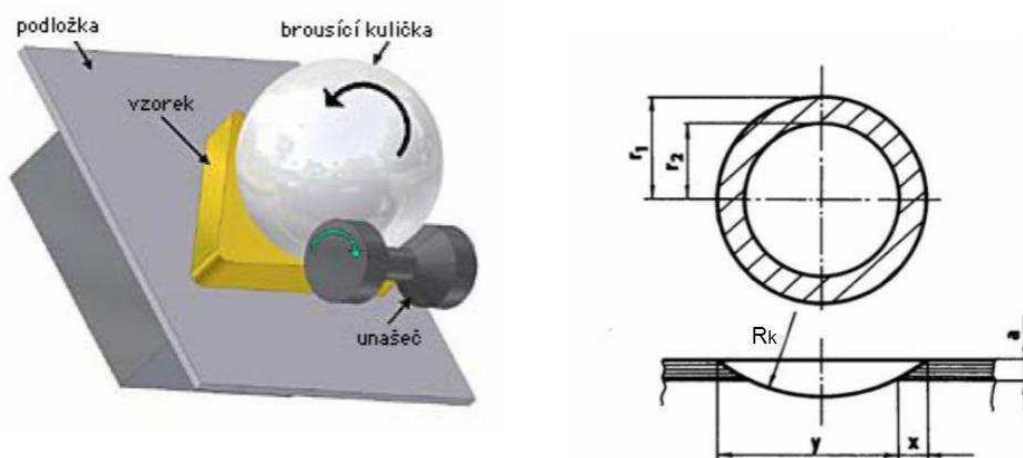
Zkouška tedy probíhá mechanickým zatěžováním povrchu zkoušeného tělesa, obvykle se měří Vickersovou metodou. Jelikož běžná tloušťka vrstev je pouze kolem několika mikrometrů, je při zkoušení třeba zajistit, aby měřící hrot nepronikl více než do 1/10 tloušťky vrstvy. Velikost zátěže se pohybuje v řádu desítek mN. Důvodem použití tak nízké síly, je požadavek, aby vlastnosti podkladového materiálu neovlivnily zjištěné hodnoty tvrdosti zkoušeného povlaku. Vzniklé stopy je velmi obtížné vyhodnocovat mikroskopem. Proto se využívá speciálních přístrojů, zvaných mikrotvrdoměry, které společně se zatěžováním hrotu zároveň měří i hloubku jeho pronikání do materiálu. Dělá tak s přesností na jednotky nm. Tvrdost vrstev se udává v GPa, ve starších literaturách můžeme najít i jednotky kg/mm². Jako další metody zkoušení tvrdosti kromě Vickersovy metody patří ještě např. Brinellova metoda, Rockwellova metoda a Knoopova metoda [2, 5].



Obr. 5.1 Vtisk po Vickersovu jehlanu [2].

5.2 Tloušťka povlaku

Tloušťka povlaku je jednou z nejdůležitějších charakteristik povlaků. Ovlivňuje jak trvanlivost nástroje, tak i řezné síly v průběhu obrábění. Tloušťka povlaku se volí podle typu operace, např. na závitnících se pohybuje kolem 1 až 2 μm , kde je tak výrazně nižší než u odvalovacích fréz, které dosahují tloušťky i 8 μm . Tloušťka vrstvy povlaku nástroje se výrazně liší i na konkrétním nástroji. Je rozdíl v tloušťce vrstvy na břitu nástroje od rovných nebo válcových ploch. Pro měření tloušťky povlaku je v dnešní době používána zejména destruktivní metoda označovaná jako „kalotest“. Měření probíhá za pomoci ocelové kuličky a diamantové pasty. Kulička na povrchu rotuje a pomocí diamantové pasty vybrousí kulový vrchlík ve kterém lze zřetelně rozpoznat mezikruží reprezentující hodnocený povlak. Z průměru kuličky a mikroskopem změřených kulových vrchlíků je možné výpočtem uvedeným v rovnici 5.1 a 5.2 stanovit tloušťku nanesené vrstvy. Parametry užití ve vzorci jsou znázorněny na obrázku číslo 5.2 [2, 5, 17].



Obr. 5.2 Znázornění neznámých pro výpočet 5.1 a 5.2 [18].

Vztahy pro výpočet tloušťky povlaku [5]

$$t = (R^2 - r_1^2)^{1/2} - (R^2 - r_2^2)^{1/2} [\mu\text{m}] \quad (5.1)$$

- kde: R_k [μm] - je poloměr kuličky,
 r_1 [μm] - je poloměr vnitřní kružnice, ohraničující povlak ze strany substrátu,
 r_2 [μm] - je vnější poloměr kulového vrchlíku.

$$t \approx \frac{x \cdot y}{2R} [\mu\text{m}] \quad (5.2)$$

- kde: R_k [μm] - je poloměr kuličky,
 x [μm], y [μm] - jsou parametry podle obrázku 5.2.

5.3 Adheze a koheze povlaku

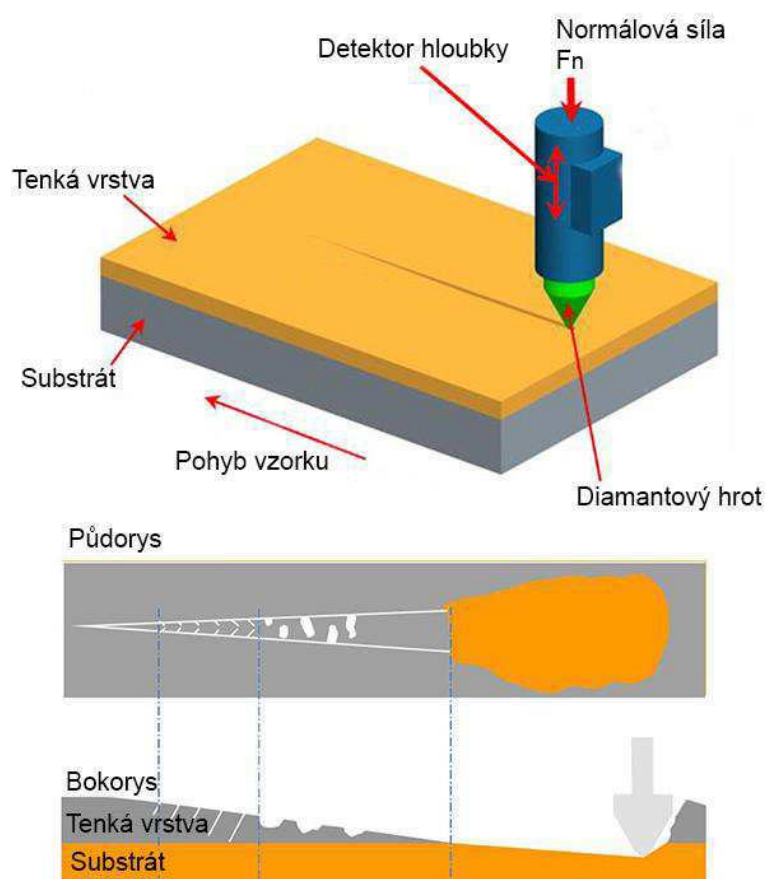
Adheze vrstvy k nástroji je velice důležitá pro maximální využití potenciální otěruvzdornosti. Závisí mimo jiné i na celkové tloušťce povlaku a podkladovém materiálu. Zjišťuje se dvěma metodami:

- Vtisková zkouška – označuje se též jako „Mercedes test“. Pro vyhodnocování se využívá mikroskopu. Na stopě vytvořené hrotem se odečte místo, kde došlo k odtržení vrstvy. Klasifikuje se podle tvaru a rozměrů trhlin a oblastí do jednotlivých tříd, s přiřazením adhezního (A) a kohezního (K) čísla, která charakterizují stupeň poškození vrstvy – praskání a odlupování. Na obrázku 5.3 je znázorněno jaké adhezní a kohezní číslo se přiřazuje podle úrovně loupání. Hodnota adheze vyšší než 60N zajišťuje, že při běžných aplikacích nedojde k odlupování vrstvy [17].



Obr. 5.3 Hodnocení porušení vrstvy v okolí vtisk pro adhezi a kohezi [19].

- Vrypová zkouška (scratch test) je znázorněná na obrázku 5.4. Při této metodě postupně vniká hrot diamantového kužele do pohybujícího se napovlakovaného vzorku. Hrot je zatížený buď konstantní nebo rostoucí silou F_n . Odtržení vrstvy od substrátu indikuje dosažení kritické hodnoty zatížení [4,16].



Obr. 5.4 Vrypová zkouška [20].

5.4 Kluzné vlastnosti povrchu

Dobré kluzné vlastnosti jsou důležité kvůli snížení frikčních sil a tím pádem i snížení tepelného zatížení nástroje. Pro měření kluzných vlastností se využívá metody tzv. pin-on-disk, kde je zkušebním tělískem válcový kolík a diskem je zkušební vzorek. Anebo se využívá obdobné metody ball-on-disk, kde zkušebním tělískem je kulička a diskem je zkušební vzorek. Testovaná vrstva je nanесena na zkušební vyleštěný vzorek a následně umístěna na otočný stolek. Hrot či kulička tlačí definovanou silou na rotující vzorek. Při měření touto metodou se využívá zatěžující síly v řádu jednotek N. Při řezných zkouškách síla dosahuje o dva řády výše. Z toho vyplývá, že toto měření je laboratorní metodou [17].

5.5 Drsnost povlaku

Drsnost povlaku je ovlivněna kvalitou opracování nástroje i povlakem. Zvýšenou tvrdost zapříčiňují mikročástice, které vznikají během povlakování. Drsnost povlaku zvyšuje potřebnou sílu při obrábění, čímž dochází ke zvyšování tepelnému namáhání břitu nástroje. Měření se provádí na vyleštěných substrátech s počáteční drsností $Ra=0,01 - 0,02 \mu m$ běžným dílenským drsnoměrem. Při měření drsnosti povrchu se neuvažují vady povrchu (risky, trhliny, důlky atd) [17].

5.6 Odolnost povlaku proti oxidaci

I oxidace přispívá k opotřebení vrstvy. Musí se rozlišovat mezi oxidací hloubkovou nebo povrchovou. Při povrchové dochází k pasivaci povrchu, která může zabránit dalšímu šíření oxidace. K destrukci vrstvy dochází při hloubkové oxidaci, ta je doprovázená poklesem tvrdosti v důsledku tvorby jiných typů mřížkových vazeb. Každá vrstva je charakterizována maximální teplotou použití, jejíž mez je dána právě odolností proti oxidaci. K měření odolnosti se většinou využívá gravimetrická metoda. V té se hodnotí změna hmotnosti vrstvy v závislosti na teplotě účinkem vzdušného kyslíku [17].

5.7 Tepelná stabilita povlaku

Při zvýšení teploty během obrábění může docházet ke změně vnitřní struktury. Charakteristiky změn vnitřních struktur se navenek projevují změnou mechanických vlastností, ty se spolehlivě vyhodnotí pomocí TEM (transmisní elektronová metoda) nebo XRD (rentgenová difrakce). Tyto metody jsou náročné na vybavení přístroji a je možné je provádět pouze na specializovaných pracovištích [17].

6 POVLAKOVÁNÍ VE FIRMĚ SHM

Vyměnitelné břitové destičky byly napovlakovány povlaky zvolenými s ohledem na fyzikální vlastnosti a možnosti firmy SHM, která sídlí ve městě Šumperku. Jedná se o českou firmu, která patří k průkopníkům průmyslové přípravy PVD povlaků. Díky vlastním výzkumům, vývoji a dlouholetým zkušenostem nabízí unikátní řešení povrchových úprav. Uplatnění povlaků je v oblasti řezných, tvářecích a stříhacích nástrojů, u forem pro tlakové lití hliníku a různých dílců zajišťujících kluzná uložení či ochranu před abrazivním otěrem [21].

6.1 Charakteristika zvolených povlaků

Jako první byl vybrán povlak zvaný pro účely bakalářské práce SHM1. Jedná se o povlak s chemickým složením TiN + vícevrstevná struktura na bázi TiAlN/TiN. Minimální udávaná mikrotvrdost je 29 GPa a barva nástroje po povlakování je zlatá.

Testovaný povlak SHM1 byl povlakován za technologických parametrů uvedených v tabulce 6.1.

Tab. 6.1 Technologické parametry povlakování povlaku SHM1

Procesní teplota [°C]	528
Tlak [mbar]	0,05
Doba povlakování monovrstvy [min]	133
Výkon [W]	7317

Druhý zvolený povlak je SHM2. Jedná se o tzv. triple povlak. Jeho chemické složení je TiN + multivrstevná struktura na bázi AlTiN/TiN + nanokompozit TiAlSiN. Multivrstva se skládá ze 14 ± 1 vrstva. Minimální udávaná mikrotvrdost je 31 GPa a barva napovlakovaného nástroje je fialovo-černá.

Testovaný povlak SHM2 byl povlakován za technologických parametrů uvedených v tabulce 6.2.

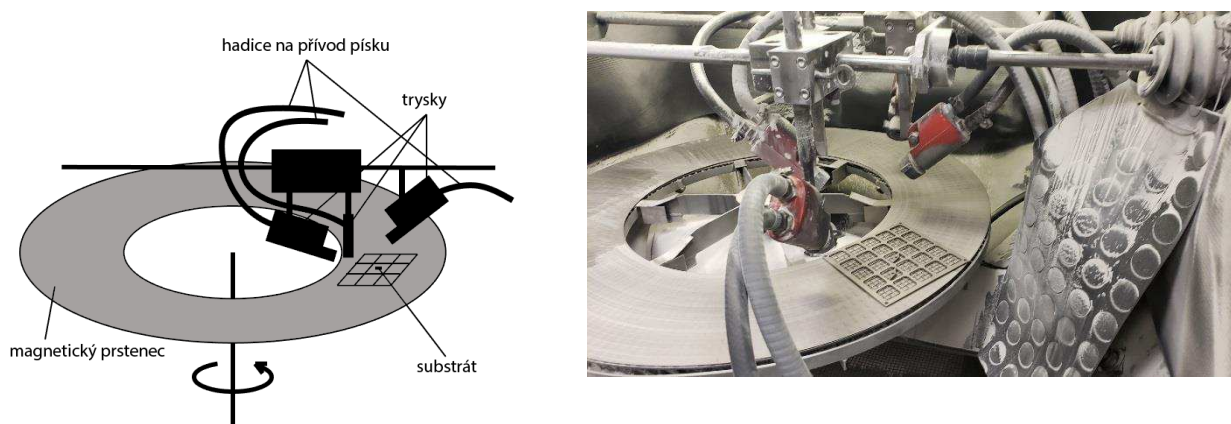
Tab. 6.2 Technologické parametry povlakování povlaku SHM2

Procesní teplota [°C]	533
Tlak -multivrstva [mbar]	0,05
Doba povlakování multivrstvy [min]	73
Výkon -multivrstva [W]	8370
Tlak -monovrstva [mbar]	0,03
Doba povlakování monovrstva [min]	37
Výkon -monovrstva [W]	10321

6.2 Příprava substrátu

6.2.1 Mechanické čištění

Jako první operace probíhá mechanické čištění nástroje. K tomuto procesu dochází v pískovací kabině. Destičky se umístí do pomocných přípravků pro usnadnění manipulace s nimi. Dále se položí na magnetický prstenec v kabině, která se uzavře a spustí se opískování. Následně se destičky otočí a dojde ke stejné operaci i pro druhou stranu nástroje, aby byla zajištěna úprava materiálu po celém povrchu destičky. Pro opískování se využilo jako tryskáč médium korund. Vnitřní část pískovacího boxu je schematicky i reálně zachycena na obrázku 6.1.



Obr. 6.1 Vnitřní část pískovacího boxu.

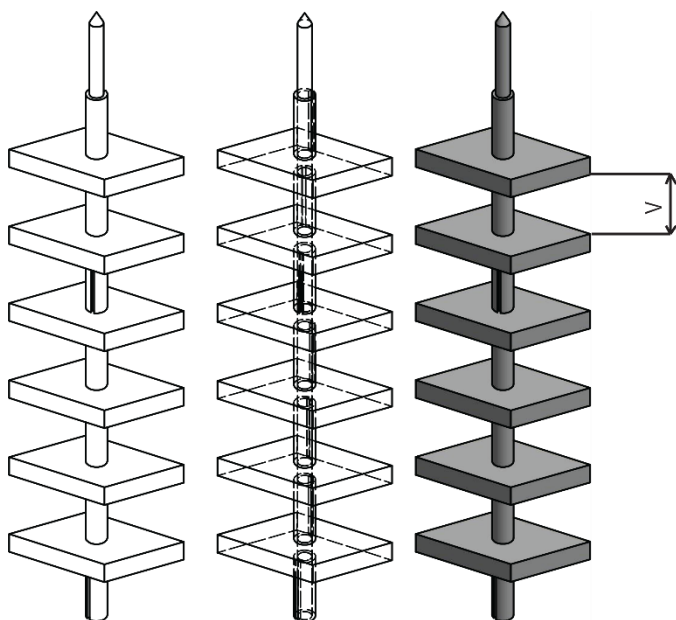
Po mechanickém čištění jsou destičky ofoukány stlačeným vzduchem díky čemuž dojde k odstranění zbytku korundu a dále jsou tzv. odmagnetovány. K odmagnetování se využívá velmi silného magnetu. Na pás jsou položeny opískované a ofoukané destičky, stále ještě umístěné na pomocných přípravcích. Pás se po zapnutí začne pohybovat pod magnetem. Tímto krokem se odstraní částičky substrátu, které se oddolily při mechanickém čištění. Na obrázku 6.2 je zachycen tento proces.



Obr. 6.2 Odmagnetovací zařízení.

6.2.2 Chemické čištění

Po mechanickém čištění a odmagnetování dochází k chemickému čištění. Destičky se tzv. naloží na nástrojový přípravek tvaru tyče za pomoci distancí, které zaručují dostatečný prostor okolo destiček pro přístup atomů kovů v průběhu povlakování. Na obrázku 6.4 je znázorněno schéma nakládání. Vždy se střídá destička s distancí. Tvar a délka distance se liší dle zvoleného povlaku, velikosti destičky a tvaru a složitosti utvařeče třísky na destičce. Běžně se využívá výšky distance tak, aby byla mezera (označená na obrázku 6.3 jako v) mezi destičkami 10 mm. Výška tyče je pevně daná, řídí se výškou planetky a povlakovací komory. Na obrázku 6.4 jsou zachycené destičky využity pro tuto bakalářskou práci. Na přípravku jsou oproti klasickému naložení bez dalších destiček a to z důvodu zaručení nezaměnění destiček za jiné.



Obr. 6.3 Schéma naložení destiček tyč.



Obr. 6.4. Naložené destičky.

Po naložení destiček se tyčky umístí do držáku, do kterého se vejde více tyčí najednou. Tento držák se následně umístí do myčky, kde dochází k samotnému chemickému čištění, tento krok je automatizován. Mechanické rameno namáčí držák s destičkami do roztoku peroxidu vodíku a následně do sušičky.

6.3 Povlakování

Po chemickém čištění, usušení a vychladnutí destiček se tyčky naloží do planetky. Jedná se o přípravek, který přenáší rotaci na tyčky pomocí ozubených kol a zároveň se i sám otáčí. Tímto je zajištěno rovnoměrné napařování povlaku po celém povrchu destičky. Tyto planetky se následně umisťují do povlakovací komory. K povlakování bylo využito povlakovací zařízení $\pi 311$ od firmy Platit. Povlakovací zařízení s napovlakovanými destičkami po procesu je zachyceno na obrázku 6.5.



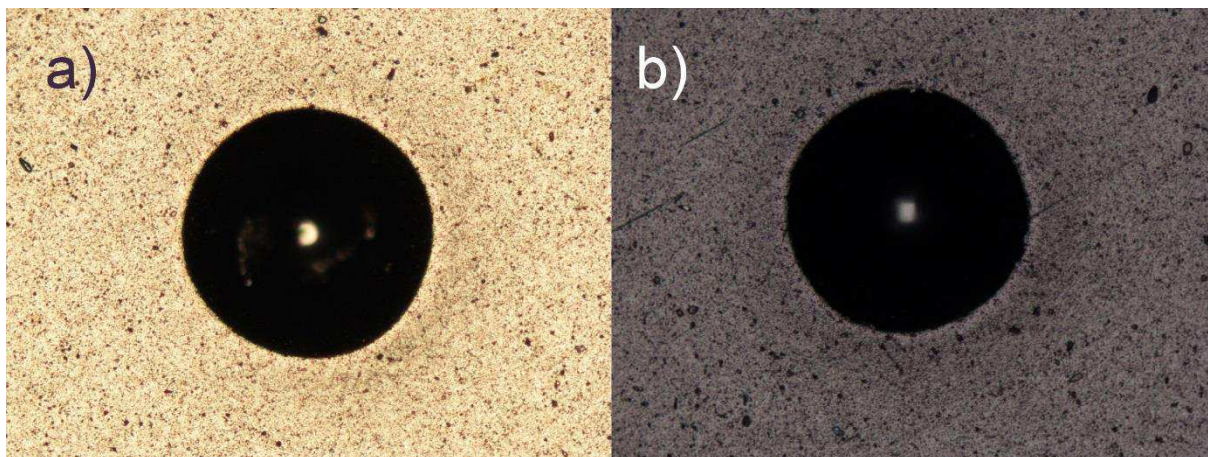
Obr. 6.5 Použité povlakovací zařízení $\pi 311$.

7 TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ POVLAKŮ

Testování napovlakovaných destiček probíhalo ve firmě SHM a ve výzkumném centru CEITEC. Centrum vzniklo v roce 2011 na základech šesti významných brněnských univerzit a výzkumných institucí. Jedná se o Vysoké učení technické v Brně; Masarykovu univerzitu; Mendelovu univerzitu v Brně; Veterinární a farmaceutickou univerzitu v Brně; Ústav fyziky materiálů, Akademie věd ČR, v.v.i a Výzkumný ústav veterinárního lékařství [22].

7.1 Zkoušení povlaku na adhezi a kohezi

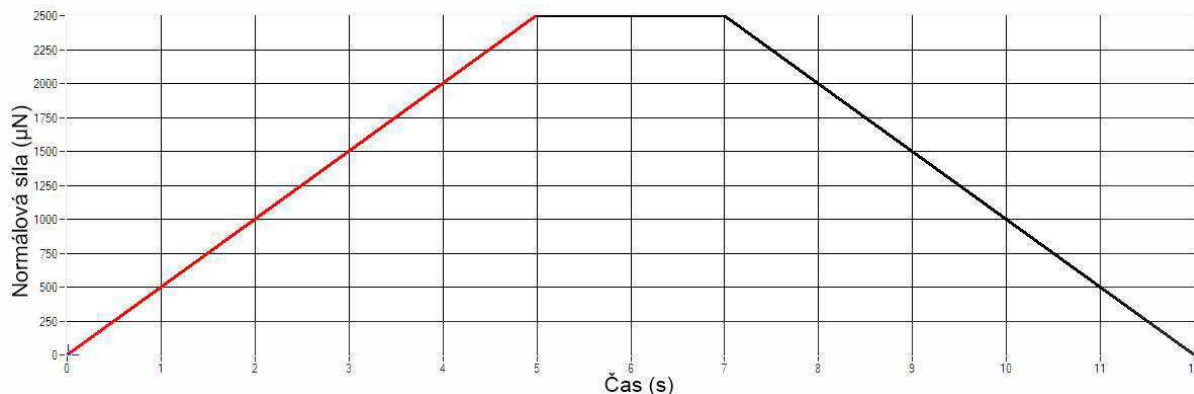
Jako první proběhla zkouška povlaku na adhezi a kohezi. Testování probíhalo ve firmě SHM. Bylo provedeno na testovacím kolečku, které se přidává do každého procesu mezi destičky. Po depozici povlaku se provedl Rockwellův test. Podle stavu povrchu v okolí vrypu se určuje, jaké hodnoty adheze a koheze dosahuje. V tomto případě jde u povlaků SHM1 i SHM2 o nulovou adhezi i kohezi. Tedy nedochází k žádnému loupání. Výsledky zkoušky jsou zachyceny na obrázku 7.1



Obr.č. 7.1. Snímek mikroskopem pro Rockwellův test. a) povlak SHM1, b) povlak SHM2.

7.2 Tvrdost povlaků

Zkoušení tvrdosti povlaků probíhalo na Hysitronu TI 950 TribolIndenter. Destičky byly uloženy na magnetický podstavec přístroje. Následně se definovaly hranice zkoušené oblasti pomocí elektronické jednotky připojené k počítači. Schéma lineárně se navyšující síly je znázorněno na obrázku 7.2.



Obr. 7.2 Časový průběh silového zatěžování při zkoušce tvrdosti povlaku.

Test tvrdosti byl proveden pro každou destičku 3x a výsledná tvrdost byla stanovena jako průměr těchto tří hodnot. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce 7.1. a zachyceny na obrázku 7.3.

Tab. 7.1 Výsledky měření tvrdosti povlaků

Vzorek	1	2	3	Průměr		Směrodatná odchylka
SHM1	29,05	29,2	29,15	29,13	[GPa]	0,062
SHM2	31,1	30,95	31,15	31,07	[GPa]	0,085



Obr. 7.3 Komora Hysitronu.

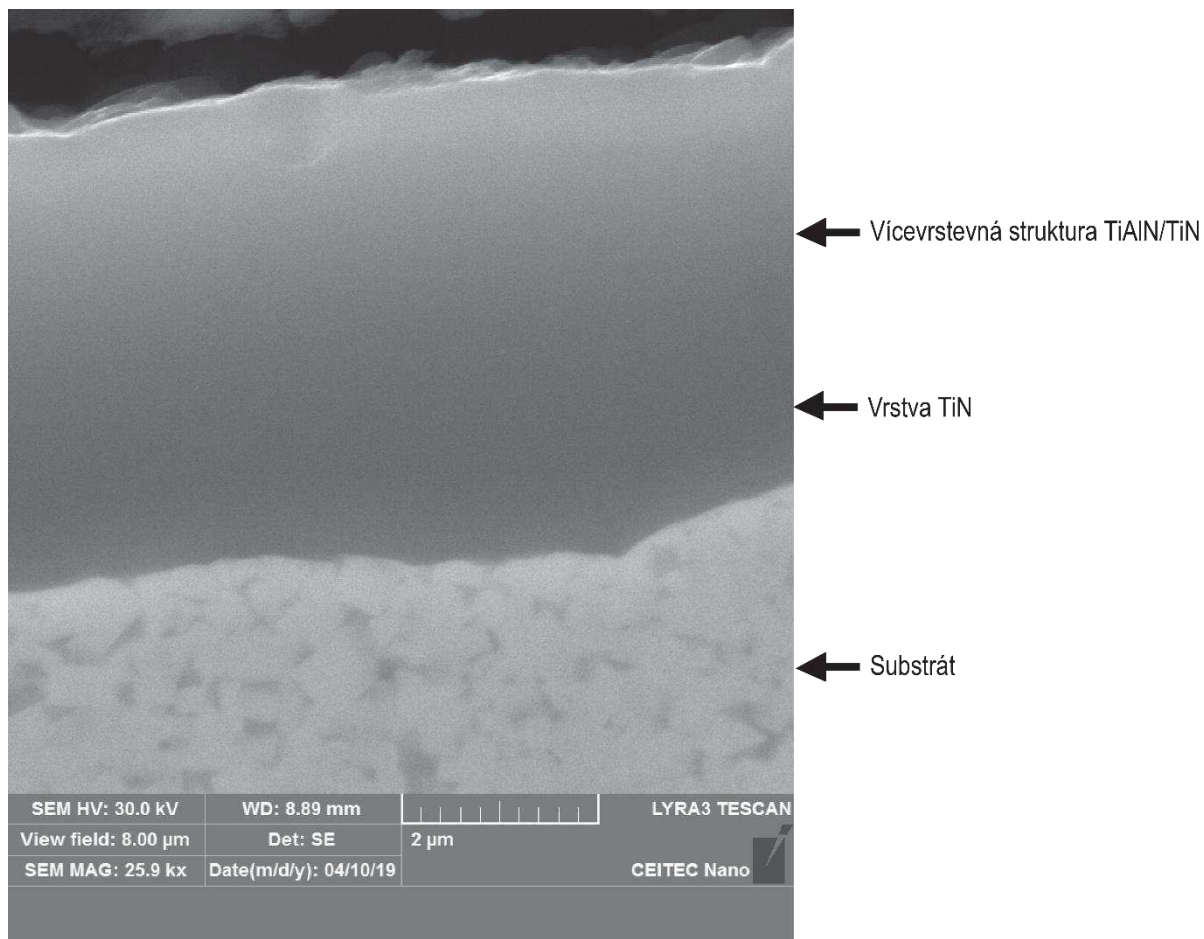
7.3 Tloušťka povlaků

Aby bylo možné změřit tloušťku povlaků, byly destičky rozříznuty za pomoci diamantového kotouče. Odřezané segmenty destičky se dále zalily do pryskyřice. Tento krok se provádí z důvodu snadnější manipulace při broušení povrchu i následného uložení do elektronového mikroskopu. Bylo k tomu využito přístroje CitoPress10 od firmy Struers. Po vytvrdnutí se výsledný válec, nazývaný špunt, umístil do metalografické brusky. Pro tento úkon bylo využito stroje značky Struers s označením Tegramin-30. Broušení probíhalo nejprve za vyšší rychlosti pro odstranění přebytečné pryskyřice, která zakrývala povrch uříznuté části destiček. Následně proběhlo broušení za použití jemného brusku pro dosažení potřebné jakosti zkoumaného povrchu. Tento krok přípravy je důležitý pro nezkreslené výsledky na elektronovém mikroskopu.

Na rozdíl od běžného mikroskopu, elektronový mikroskop využívá místo zdroje světla svazek elektronů. Výsledky pak nejsou pozorovány přímo pouhým okem, ale vykreslují se na fluorescentní stínítko, fotografickou desku či monitor. Tohoto mikroskopu se využívá díky řádově 100 000x větší možnosti zvětšení pozorovaného objektu, než u klasických mikroskopů. Je to způsobeno tím, že viditelné světlo má vlnovou délku λ přibližně 550 nm. Tudíž tento mikroskop dokáže objekt zvětšit zhruba 1 000x. Oproti tomu vlnová délka urychleného elektronu (60kV) je přibližně 0,005nm, což je 100 000x kratší, a tak dokáže příslušný objekt přiblížit až 100 000 000x. Na takto pořízené fotografii je možné vidět vrstvení povlaku a zjistit tloušťku povlaku [23, 24].

7.3.1 Povlak SHM1

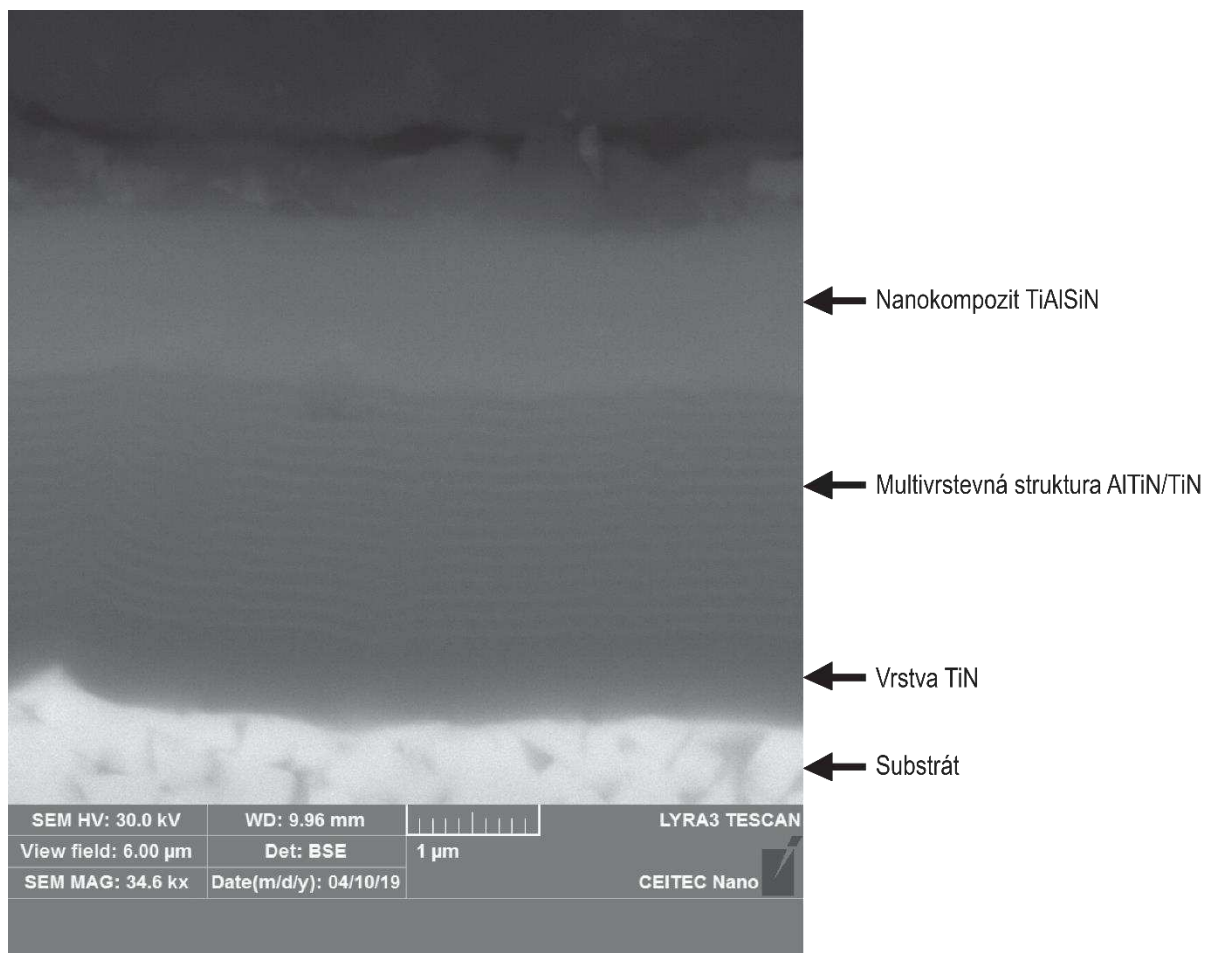
Z obrázku 7.4. je možné změřit tloušťku povlaku SHM1. V místě měření dosahovala hodnoty 4,93 μm . Jelikož se jedná o velmi malou oblast, může se tloušťka povlaku v různých místech lehce lišit.



Obr. 7.4. Řez destičkou s povlakem SHM1.

7.3.2 Povlak SHM2

Z obrázku 7.5. je možné změřit tloušťku povlaku SHM2. V místě měření dosahovala hodnoty 3,958 μm . Taktéž platí, že se jedná o velmi malou oblast, a tak se může tloušťka povlaku v různých místech lehce lišit.



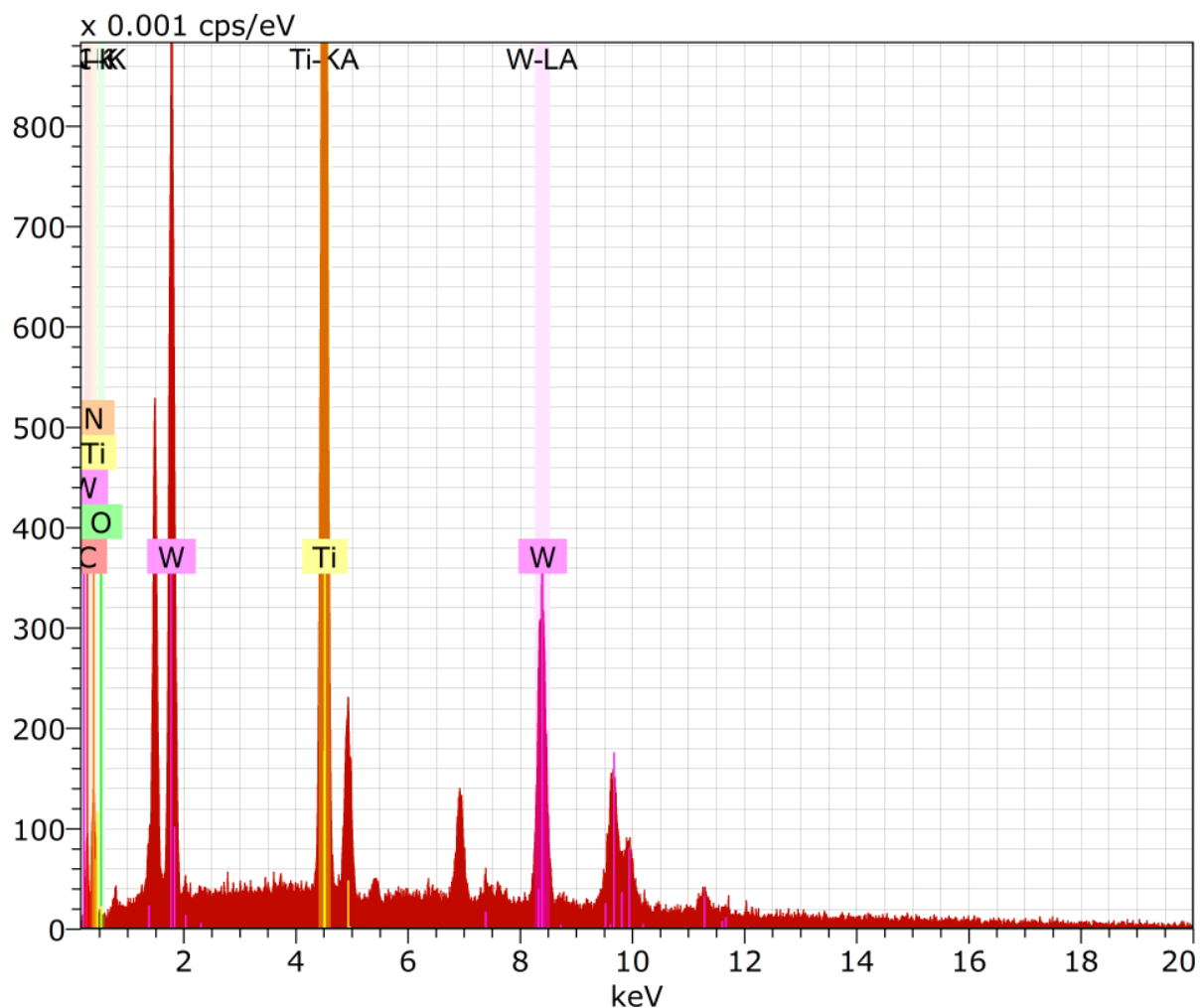
Obr. 7.5 Řez destičkou s povlakem SHM2.

7.4 Chemické složení povlaků

Pro určení chemického složení bylo využito elektronového mikroskopu. Jedná se o rentgenovou absorpční spektroskopii. Jelikož absorpce rentgenového záření závisí na druhu a množství daného atomu, mohou pak být v důsledku různé absorpce rentgenovaného záření poskytnuty informace o fyzikální struktuře materiálu.

7.4.1 Povlak SHM1

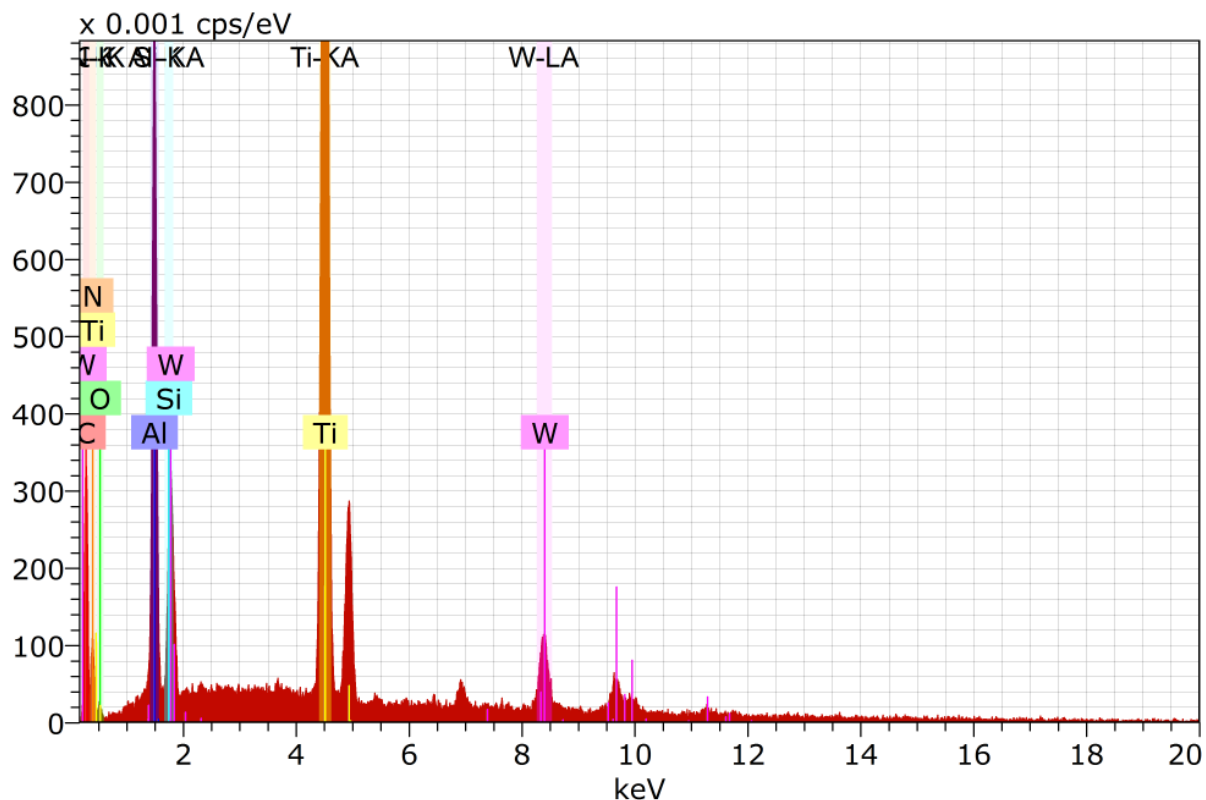
Na obrázku 7.6. je zachyceno chemické složení povlaku SHM1. Jedná se o hodnoty, kde elektronový mikroskop provedl sám detekci prvků a nebyly zadány ručně. Proto se zobrazují i prvky jako například O, C, které se v povlaku nevyskytují, avšak jsou způsobeny kombinací z okolí při transportu vzorku.



Obr. 7.6 Chemické složení povlaku SHM1.

7.4.2 Povlak SHM2

Na obrázku 7.7. je zachyceno chemické složení povlaku SHM2. Stejně jako u povlaku SHM1 i zde se jedná o hodnoty, kde elektronový mikroskop provedl sám detekci prvků a nebyly zadány ručně. Proto se zobrazují i prvky jako například O, C, které se v povlaku nevyskytují, avšak jsou způsobeny kombinací z okolí při transportu vzorku.



Obr. 7.7 Chemické složení povlaku SHM2.

ZÁVĚR

Technologie obrábění prošla spolu s ostatními strojírenskými technologiemi dlouhým vývojem a stále se vyvíjí v důsledku narůstajících požadavků spotřebitelů.

Vhodně zvolený řezný materiál a úprava povrchu ovlivní produktivitu výroby. Bakalářská práce je zaměřena na problematiku řezných nástrojů a v rešeršní práci řeší nejpoužívanější typy materiálů a metody nanášení tenkých vrstev povlaků, stejně jako testování a vyhodnocování jejich fyzikálních vlastností.

Na základě rešeršní bakalářské práce o fyzikálních vlastnostech a dle možností firmy SHM s.r.o. byly následně vybrány dva povlaky SHM1 a SHM2. Tyto povlaky byly naprášeny na vyměnitelné břitové destičky a následně na nich proběhla série testů. Testy byly zaměřeny na technické parametry povlaků. Jednalo se o test na adhezi a kohezi, kde pro oba povlaky vyšla hodnota 0. Tento test proběhl opět ve spolupráci s firmou SHM. Další testování proběhlo v institutu Ceitec, kde došlo k rozřezání vyměnitelných břitových destiček za účelem změření tloušťek povlaků. Tloušťka povlaku pro SHM1 vyšla 4,93 μm , pro SHM2 3,958 μm . Vyhodnocení chemického složení bylo provedeno na elektronovém mikroskopu. Poslední zkouška proběhla na tvrdost povlaků. Povlak SHM1 dosahoval tvrdosti 29,13 GPa a SHM2 dosahoval tvrdosti 31,07 GPa. Výsledky testování pro záměry bakalářské práce byly shodné s parametry udávanými firmou.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- 1 PÍŠKA, Miroslav a Katrin BUČKOVÁ. Řezné materiály současnosti. *MM Spektrum* [online]. 09.05.2018, , 1 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti.html>
- 2 TUNA, Jaroslav. *METODY POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ* [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/6722/2012_DP_Tuna_Jaroslav_123316.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR3XUMHLpvDqiqSgJw2mEkDdilKgVg3hWPZzzlEtivQEZTBuUiqlukb4qoE. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.
- 3 PÍŠKA, Miroslav. Povlaky, povlaky... bez nich to už prostě nepůjde!. *MM Spektrum* [online]. 11.02.2015 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlaky-povlaky-bez-nich-to-uz-proste-nepujde.html>
- 4 HUMÁR, Anton. Technologie I – Technologie obrábění 1. část [online]. Studijní opory. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138s [cit. 2019-03-11]. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- 5 HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. 2008. Praha: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- 6 VODÁK, Marek. *ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI STŘIŽNÝCH NOŽŮ POVLAKOVÁNÍM*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- 7 LIBRA, Martin. Naprašování tenkých vrstev. *Elektro* [online]. 2003, **2003**(7) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>
- 8 FITL, Přemysl, Jan VLČEK, Eva MAREŠOVÁ a Šárka HAVLOVÁ. *Naprašování* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/0040~84sPC1FITcksAQA.pdf?redirected>. Průručka ovládání nástroje. Fakulta chemicko-inženýrská VŠCHT Praha
- 9 Hivatec Laboratory. [Http://hivatec.ca](http://hivatec.ca) [online]. Canada [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://hivatec.ca/consulting-design/thin-film-deposition/>
- 10 HOŘEJŠ, Slavomír. *CVD povlaky - cesta pro zvýšení produktivity a snížení provozních nákladů* [online]. 2008(2) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/2-2008/CVD_povlaky_tribologia.html?fbclid=IwAR0fSQSZo7yDtr15AYNiOvHCDrK7VE690z5ZfdEAEJLNhhEFESpVKiSk1PA
- 11 ÚSTAV FYZIKY. Metody depozice povlaků – CVD [online]. Studijní opory. ČVUT FS, [cit. 2019-05-22]. Dostupný z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_7.pdf
- 12 Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM Spektrum* [online]. **2001**(7) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html?fbclid=IwAR2PZI2moczXTQwPChS_RQb0mMHAAXrpax41giKHUelhmiDFWgzfsV4wtOI
- 13 FOLTÝN, Michal. *POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6370. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.
- 14 PODANÝ, Pavel. *Studium vlivu předdepozičních procesů na vlastnosti progresivních tenkých vrstev* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z:

-
- https://www.opi.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_podany.pdf. Studijní materiál. Západočeská univerzita v Plzni.
- 15 PODANÝ, Pavel a Antonín KŘÍŽ. *PŘEDDEPOZIČNÍ PROCESY PŘI VÝROBĚ TENKÝCH VRSTEV* [online]. Hradec nad Moravicí, 2006 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/podany_metal06.pdf. Západočeská univerzita v Plzni.
 - 16 HOLUBÁŘ, Pavel, Michal ŠÍMA a Ondřej ZINDULKA. Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM Spektrum* [online]. 2005, **2005**(9) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html>
 - 17 ŠÍMA, Michal, Mojmír JÍLEK, Pavel HOLUBÁŘ a Ondřej ZINDULKA. Měření vlastností povlaků na nástrojích Měření vlastností povlaků na nástrojích. *MM Spektrum* [online]. 2004, 16.06.2004, (6) [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich.html>
 - 18 PERTLÍK, Dan. *VLIV PODLOŽKY NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI POVLAKŮ PŘI MAGNETRONOVÉM NAPRAŠOVÁNÍ* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/39500511-Vliv-podlozky-na-mechanicke-vlastnosti-povlaku-pri-magnetronovem-naprasovani.html>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. RNDr. Vladimír Starý, CSc.
 - 19 SOSNOVÁ, Martina a Antonín KŘÍŽ. *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování*. [online]. 2006 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnova.pdf. Studijní text. Západočeská univerzita v Plzni.
 - 20 *Gardco* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://gardco.com/pages/adhesion/fischerscope.cfm>
 - 21 *SHM* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://shm-cz.cz/predstaveni-spolecnosti-shm/>
 - 22 *Ceitec* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.ceitec.cz/about-us/>
 - 23 *Katedra fyziky PřF UJEP* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~mkormund/P219/NanoMataChar-prednaska4.pdf>
 - 24 MATĚJKA, Pavel. *Elektronová mikroskopie a RTG spektroskopie* [online]. In: . s. 43 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/06-Elektronova-mikroskopie-a-RTGspektroskopie.pdf?redirected>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
Ar		Argon
CVD		Chemical Vapour Depositio - Chemická depozice vrstev
Fn	N	Normálová síla
J	$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	proudová hustota iontů
N ₂		Dusík
PD		Diamantový povlak
PVD		Physical Vapour Deposition - Fyzikální napařování
R	$\text{\AA} \cdot \text{min}^{-1}$	rychlost eroze terče
Ra	μm	drsnot povrchu
Rk	μm	poloměr kuličky
RO		rychlořezná ocel
S	atomy/iont	výtěžnost naprašování
SK		slinuté karbidy
TEM		transmisní elektronová metoda
m_t	g	atomová hmotnost
r_1	μm	poloměr vnitřní kružniceohraničující povlak ze strany substrátu
r_2	μm	Vnější poloměr kulového vrchlíku
v	mm	délka distance
t	μm	tloušťka povlaku
λ	nm	vlnová délka
ρ	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	měrná hmotnost materiálu terče